

БЕЗПРОЗВАННИХ ГАННА ВІКТОРІВНА ✉ – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електроізоляційної та кабельної техніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9584-3611>; e-mail: Hanna.Bezprozvannukh@khpi.edu.ua.

СІЯТОВСЬКИЙ ДЕНИС ОЛЕГОВИЧ – здобувач кафедри електроізоляційної та кабельної техніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; e-mail: Denys.Siatovskiy@ieec.khpi.edu.ua.

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВИХ КАБЕЛІВ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ ДЛЯ АКТИВНИХ МЕРЕЖ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ГЕНЕРАЦІЇ

У статті розглянуто стратегічний напрямок розвитку електроенергетичної галузі України, пов'язаний з реновацією та модернізацією електричних мереж середньої напруги шляхом трансформації з рівнів напруги 6/10 кВ на напругу 20 кВ з одночасним об'єднанням з локальними джерелами розподіленої генерації. Аргументовано стійкість до потенційних загроз підземних кабелів середньої напруги з ефективною інтеграцією в сучасні архітектури кільцевих та петльових розподільних мереж. Наголошено на наслідках інтеграції з перетворенням пасивних мереж на активні з процесами двостороннього обміну електричною енергією. Проаналізовано виникнення підвищених рівнів напруги та небезпечних однофазних замикань, які безпосередньо впливають на експлуатаційні характеристики та технічний стан силових підземних кабелів. Визначено конструктивні напрямки для пом'якшення впливу розподіленої генерації на силові кабелі середньої напруги зі зменшеними рівнями ризику в мережі. Доведено, що систематичне зростання робочої напруги на 20 % через неконтрольовану генерацію в години мінімального навантаження підвищує напруженість електричного поля в однорідній ізоляції кабелів. Наголошено на ефективності більшої товщини зшитої поліетиленової ізоляції у кабелях з більшим перерізом струмопровідних жил. Показано, що за умови однофазних замикань підвищена напруга може стати каталізатором розвитку часткових розрядів в мікропорожнинах меншого розміру в зшитій поліетиленовій ізоляції силових кабелів напруги 20 кВ. Акцентовано на необхідності проведення вимірювань ч астових розрядів за декількох значень випробувальної напруги для оцінки діапазону розмірів активованих повітряних включень в товщі зшитої поліетиленової ізоляції. Обґрунтовано ефективність збільшення товщини зшитої поліетиленової ізоляції щодо зменшення електричної ємності та ємнісного струму зарядки силових кабелів більшого перерізу.

Ключові слова: активні розподільні мережі; силові кабелі середньої напруги; експлуатаційні характеристики кабелів; товщина ізоляції; коефіцієнт нерівномірності електростатичного поля; однофазне замикання; часткові розряди в ізоляції; електрична ємність та струм зарядки кабелю.

Вступ. Модернізація та трансформація мережевої інфраструктури розподільних електричних мереж середньої напруги зі збільшенням навантаження, зменшенням ризику несправностей та обробки двосторонніх потоків енергії від розподілених джерел генерації (РДГ), є основним рушієм стимулювання зростання ринку силових кабелів [1]. Сонячні парки, вітрові електростанції та установки зберігання енергії покладаються на сучасні кабельні лінії середньої напруги для передачі енергії до підстанцій, у тому числі до цифрових. Вразливість повітряних розподільних мереж середньої напруги до потенційних загроз переносить акцент на підземні кабельні лінії [2, 3].

У більшості європейських країн мережі середньої напруги виконані переважно у кабельному варіанті [4, 5]. Попит на кабелі середньої напруги зі зшитою поліетиленовою та термопластичною ізоляцією в Європі зумовлений її енергетичною інфраструктурою, пов'язаною з електрифікацією, стійкістю мережі та інтеграцією з відновлюваними джерелами енергії. Багато європейських країн замінюють застарілі розподільчі активи, встановлені десятиліття тому, переходячи з повітряних ліній на підземні кабельні лінії середньої напруги для зменшення ризиків відключень та покращення безпеки у містах [6–8]. Так, ринок у Німеччині оцінюється в 1,46 мільярда доларів США у 2025 році. Німеччина швидко модернізує розподільні мережі для інтеграції відновлюваної генерації, розширює електрифікований транспорт та замінює застарілі підземні активи в щільно

забудованих міських районах. Промислові регіони також покладаються на кабельні системи середньої напруги для підтримки потужних виробничих навантажень, що стимулює зростання ринку силових кабелів середньої напруги [4, 5].

Світовий сегмент силових кабелів середньої напруги (16–35 кВ) демонструє найшвидше зростання у 2025 році і, як очікується, зростатиме зі середньорічним темпом зростання (Compound Annual Growth Rate, CAGR) 10,43 % [1], але поки поступається повітряним лініям електропередавання (рис.1) [1]. У 2025 році сегмент повітряних ліній домінував з часткою 63,38 % (рис.1) [1].

Global Medium Voltage Cables Market Share, By Installation, 2024



Рисунок 1 – Співвідношення між встановленими повітряними та силовими підземними кабельними лініями середньої напруги у світі [1]

Важливим моментом оптимізації та підвищення ефективності розподільних мереж є переведення їх з

© Г. В. Безпрозваних, Д. О. Сіятовський, 2026



Ця робота ліцензується відповідно до *Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)*
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

напруги 35, 10 і 6 кВ на клас напруги 20 кВ [9–12]. Цей перехід розглядається як ключовий напрямок для подальшого скорочення кількості етапів трансформації в системі електропостачання в Європі та в Україні. Перехід на напругу 20 кВ вимагає заміни та будівництва нових ліній. Це відкриває можливості для організації нової інтелектуальної системи управління та контролю потоків потужності. Це особливо важливо в контексті інтеграції з розподіленими джерелами генерації при застосуванні силових кабелів з інтегрованими у конструкцію оптичними волокнами для моніторингу струмового навантаження в мережі [13].

Інновації можуть суттєво змінити розподільні мережі: кабельні технології пропонують реальні рішення, які перетворюють розподільну інфраструктуру на активного гравця [13].

Задля забезпечення потреби в кабелях середньої напруги у розподільних мережах з РДГ відомі європейські виробники інвестують у виробництво. Так, у 2024 році лідер світового виробництва кабельної продукції фірма NKT, заснована у 1891 році, оголосила про інвестування приблизно 100 мільйонів євро на своїх заводах у Данії, Швеції та Чеській Республіці для розширення виробничих потужностей кабелів середньої напруги в діапазоні напруги (20–110) кВ [14]. Важливо, що виробничі потужності працюють на 100 % відновлюваної електроенергії [14].

Силові кабелі середньої напруги ефективно інтегруються з сучасними кільцевими та петльовими розподільними архітектурами, підтримуючи резервування та стійкість електричної мережі з розподіленими джерелами генерації [15]. Це означає, що кабелі середньої напруги є одним з основних компонентів проектування розподільних мереж з інтегрованими відновлюваними джерелами енергії, а не додатковим доповненням [14–17].

Метою статті є визначення шляхів забезпечення експлуатаційних характеристик силових кабелів середньої напруги 20 кВ на технологічній стадії їх виготовлення для розподільних електричних мереж змінного струму з відновлюваними джерелами генерації.

Постановка проблеми. Традиційно розподільні електричні мережі середньої напруги (6–10) кВ (в Україні) та до 35 кВ (у світовій практиці) будувалися за радіальним принципом та проектувалися для односпрямованого потоку потужності: від потужних генеруючих джерел через мережі високої та надвисокої напруги, понижувальні підстанції до кінцевого споживача [7–11]. У такій моделі мережа середньої напруги є пасивним елементом, що виконує виключно функцію розподілу напруги. Відповідно, забезпечення допустимого спаду напруги у найбільш віддаленій точці радіальної лінії є головним критерієм надійності кабельних ліній в експлуатації. Аналіз проблем, пов'язаних з електричними мережами середньої напруги з розподіленою генерацією, також відомої як децентралізована або дисперсна генерація, доводить, що така інтеграція докорінно змінює саму суть розподільної мережі. У цьому випадку парадигма пасивної електричної мережі середньої напруги зазнає

кардинальних змін: перетворюється з пасивної на активну [15]. Ключову роль в такій активній мережі відіграють процеси двостороннього обміну електричною енергією. Саме фундаментальна зміна напрямку руху потужності від об'єкта генерації назад до підстанції стає першопричиною підвищення напруги вище номінального значення – «Voltage Rise» (рис. 2) [15, 18]. На підставі оброблених даних [15] на рис. 2 представлено порівняльний аналіз змінення напруги в кабельній лінії для пасивної та активної мережі з РДГ. Синя лінія (традиційна, пасивна мережа) плавно спадає від 20,5 кВ до 18,8 кВ через втрати електромагнітної енергії в кабелі. Напруга в кабельній лінії з РДГ (червона лінія) спочатку спадає, а потім різко зростає до 21,2 кВ на довжині 20 км. Це і є демонстрація ефекту «Voltage Rise» [15, 18, 19]. Такі проблеми притаманні для мереж з фотоелектричними джерелами, оскільки в них спостерігається значне підвищення напруги, що перевищує допустиме значення [20, 21].

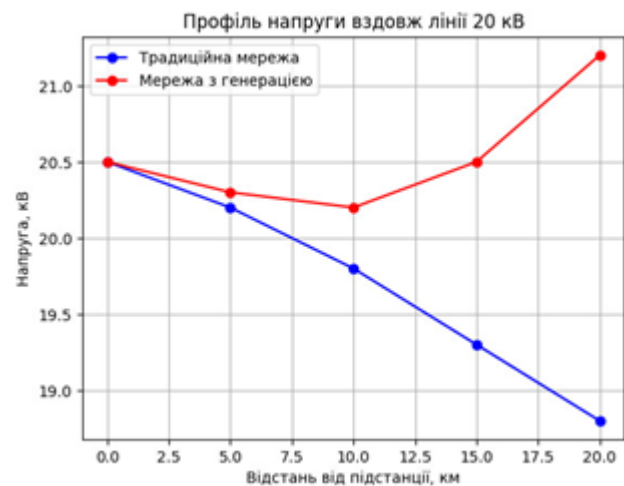


Рисунок 2 – Профіль напруги вздовж кабельної лінії напруги 20 кВ у традиційному режимі та за наявності генерації від об'єкта розподіленої генерації

Для кабелів напруги 20 кВ такий режим створює додаткове електричне навантаження на ізоляцію. Систематичне наближення робочої напруги до цієї межі через неконтрольовану генерацію в години мінімального навантаження підвищує напруженість електричного поля в електричній ізоляції, що може стати каталізатором розвитку водних тріантів у разі наявності мікроефектів та інтенсифікувати часткові розряди в мікропорожнинах.

На відміну від повітряних ліній, кабельні лінії напруги 20 кВ мають значно менший індуктивний опір, але більшу електричну ємність [22, 23]. Відповідно, кабельна лінія постійно генерує значний ємнісний струм зарядки: 0,6–1,72 А/км для кабелів з перерізом струмопровідних жил 70–800 мм². У розгалужених мережах напруги 20 кВ сумарний зарядний струм може сягати десятків і сотень ампер, що еквівалентно генерації значної реактивної потужності. Це ускладнює регулювання напруги трансформаторами на головній підстанції [10].

Поява джерел розподіленої генерації також змінює характер короткочасних аварійних процесів у мережі [19, 20, 24, 25]: РДГ стають додатковими джерелами живлення струмів короткого замикання (КЗ), особливо небезпечних однофазних. Синхронні генератори (когенераційні установки) дають значний струм підживлення, що в (5–7) разів перевищує їх номінальний струм. Інверторні установки обмежують струм КЗ на рівні 1,2–1,5 від номінального, але сумарний ефект у мережі з багатьма джерелами генерації є суттєвим [25]. Це породжує низку нових викликів для кабельних ліній та самих кабелів в цілому [24, 25]. Тривалість електричного та теплового навантаження на силові кабелі середньої напруги в такому випадку суттєво зростає.

Шляхи забезпечення експлуатаційних характеристик силових кабелів для активних розподілених мереж. В розподілених мережах середньої напруги з розподіленою генерацією для забезпечення надійності силових кабелів провідні Європейські виробники [26] закладають не тільки номінальну фазну U_{ϕ} і лінійну U_L напругу, а і більше на 20 % значення напруги U_M відповідно до стандарту EN 50160 [27] (табл. 1).

Таблиця 1 – Шкала значень напруги силових кабелів європейських виробників [27]

Клас напруги, кВ	10	15	20	30	50
Фазна напруга U_{ϕ} / лінійна напруга U_L , кВ	6/10	8,7/15	11,5/20	18/30	36/50
Збільшена на 20 % лінійна напруга U_M , кВ	12	17,5	24	36	72,5

Рівні ізоляції силових кабелів для активних розподілених мереж. У США ця проблема вирішується завдяки збільшенню товщини ізоляції силових кабелів середньої напруги. Топології електричних мереж США мають суттєві відмінності від європейських: переважно використовують радіальну конфігурацію, причому мережа низької напруги практично відсутня. Лінії середньої напруги є основою розподілених мереж. Для забезпечення надійності експлуатації силових кабелів середньої напруги розрізняють три рівні ізоляції. Кабелі зі 100 % рівнем ізоляції застосовуються у мережах, в яких системи релейного захисту та автоматики відключають кабельну лінію від мережі за час, менше за 1 хвилину. Кабелі з рівнем ізоляції 133 % застосовуються у мережах, у яких замикання триває більше 1 хвилини, але менше 1 години. Кабелі з рівнем ізоляції 173 % використовуються, коли замикання фази на землю, залежно від системи, проявляється як повна лінійна напруга на ізоляції протягом більше 1 години [28].

Збільшення класу напруги (табл. 1) від 10 кВ до 50 кВ безпосередньо впливає на товщину ізоляції. Причому для одного класу напруги товщина ізоляції залишається незмінною незалежно від перерізу струмопровідної жили силових кабелів. Виробники силових кабелів закладають мінімальне середнє

значення товщини ізоляції відповідно до [29]. Врахування перевищення напруги на 20 % в умовах експлуатації потребує збільшення товщини ізоляції на технологічній стадії виготовлення силових кабелів.

Типова конструкція одножильного силового кабелю на напругу 20 кВ коаксіальної конструкції для прокладання в ґрунті представлена на рис. 3 [26].



Рисунок 3 – Типова конструкція силового кабелю на напругу 20 кВ для прокладання в ґрунті [26]

Цифрами на рис. 3 позначено:

1 – багатодротна струмопровідна жила: провідники класу 2 виготовлені з електролітичного міді або високочистого електролітичного алюмінію;

2, 4 – напівпровідні екрани товщини 0,5 мм по струмопровідній жилі (2) для покращення розподілу електричного поля по поверхні провідника та ізоляції (4) для забезпечення радіального електричного поля на її поверхні;

3 – електрична ізоляція на основі:

а) зшитого поліетилену (Cross-Linked Polyethylene, XLPE) (найбільш розповсюджений матеріал в Європі),

б) трингостійкого TR-зшитого поліетилену – вдосконалений варіант XLPE, спеціально розроблений для уповільнення розростання водяних тринтів («дерев») – мікроскопічних каналів, заповнених водою, що призводить до інтенсифікації процесів старіння високоякісної поліетиленової ізоляції;

в) високомодульної етилен-пропіленової гуми (Hard Grade Ethylene Propylene Rubber, HEPR) – в більшій мірі застосовується у кабелях американських виробників);

г) інноваційна термопластична ізоляція на основі композицій поліпропілену та поліетилену з робочою температурою 110 °С;

5 – металевий мідний екран, що складається з мідних дротів, розміщених по спіралі, для забезпечення безпеки експлуатації та відведення вихрових струмів на землю;

6 – проміжна захисна оболонка;

7 – водоблокуюча стрічка;

8 – алюмополімерна стрічка;

9 – зовнішня оболонка з поліетилену.

Електростатичне поле в однорідній ізоляції силових кабелів коаксіальної конструкції. Для одножильних силових кабелів коаксіальної конструкції (рис. 3) електростатичне поле в однорідній ізоляції (макроскопічне наближення: нехтування гетерогенністю поліетилену, який складається з кристалічної та аморфної фаз) кабелю при змінному струмі є плоскопаралельним.

Розподіл потенціалу U у всіх паралельних площинах, нормальних до осової координати, є однаковим і залежить тільки від радіуса r . Розподіл

потенціалу по товщині ізоляції (діелектрична проникність ізоляції не залежить від напруженості електричного поля) за відсутності в ній об'ємних зарядів визначається на підставі розв'язку рівняння Лапласа [23]: $\frac{1}{r} \dots \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \dots \right) = 0$ з урахуванням постійної інтегрування, що визначається з початкових умов: при значенні поточного радіусу r , рівного радіусу струмопровідної жили ($r = R_1$), потенціал φ дорівнює потенціалу на жилі $\varphi = U$; при значенні поточного радіусу r , що дорівнює радіусу по ізоляції ($r = r_{13}$), потенціал на металевій оболонці дорівнює 0 ($\varphi = 0$ – металевий екран заземлено). Це надає можливість отримати розподіл напруженості E електростатичного поля по поточному радіусу, тобто по товщині ізоляції $\Delta = r_{13} - R_1$:

$$E(r) = \frac{U}{r \ln \left(\frac{r_{13}}{R_1} \right)}. \quad (1)$$

З (1) витікає: в разі однорідної ізотропної ізоляції електричне поле в силовому кабелі коаксіальної конструкції неоднорідне по товщині ізоляції: максимальне на поверхні струмопровідної жили і мінімальне на поверхні ізоляції кабелю.

Напівпровідні екрани по струмопровідній жилі для покращення розподілу електричного поля по поверхні провідника та ізоляції для забезпечення радіального електричного поля по її поверхні не впливають на розподіл електростатичного поля по товщині ізоляції. В процесі експлуатації під дією тепла та електричного поля спостерігається інжекція зарядів провідного наповнювача (сажі) з напівпровідних екранів у шпиту поліетиленову ізоляцію [30]. Напівпровідні покриття характеризуються високими значеннями питомої об'ємної провідності, діелектричної проникності та коефіцієнту діелектричних втрат, що обумовлено морфологічними та структурними особливостями наповненої сажею поліетиленої матриці [30]. Діелектрична проникність такого композитного матеріалу варіюється від 800 до 1000 для частоти 50 Гц та суттєво залежить від частоти [31].

Особливості електрофізичних характеристик напівпровідних екранів у широкому діапазоні частоти необхідно враховувати за наявності перехідних електромагнітних процесів у електричних мережах з силовими кабелями середньої напруги з полімерною ізоляцією [31]. Змінення вихідної потужності джерел розподіленої генерації протягом доби може сягати 50–60 %, що призводить до коливань напруги в мережі та гармонік вищих порядків. В результаті в мережі виникають електромагнітні коливання різної частоти [32, 33]. Коливання напруги та струму поширюються електромагнітними хвилями через електромережу. Спектр електромагнітних хвиль досягає десятків МГц [32, 33].

На рис. 4 представлено результати моделювання розподілення напруженості електростатичного поля по товщині ізоляції силових кабелів для струмопровідних жил перерізом 240 мм² (криві 1, 4) та 800 мм² (криві 1', 4')

20 кВ (фазна напруга між жилою та заземленим екраном 12 кВ): мінімальне значення товщини ізоляції становить 5,5 мм – криві 1-1'; збільшене на 18 % становить 6,5 мм – криві 4-4' відповідно. Криві 2-3 та криві 2'-3' відповідають випадку перевищення лінійної напруги на 20 % для жил перерізом 240 мм² і 800 мм² за товщини ізоляції 5,5 мм – криві 2-2' та збільшеній на 18 % – криві 3-3' відповідно.

Для струмопровідних жил різного перерізу одного класу напруги 20 кВ визначені коефіцієнти нерівномірності розподілення електричного поля по товщині ізоляції $K = E_{\max} / E_{\min}$ як відношення максимального значення E_{\max} напруженості поля на поверхні струмопровідної жили до найменшого E_{\min} на поверхні ізоляції (рис. 5).

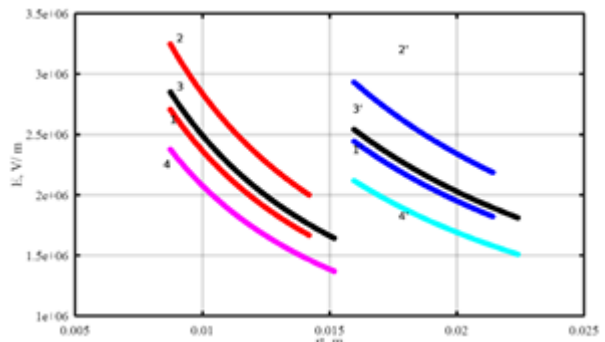


Рисунок 4 – Вплив товщини однорідної ізоляції на розподіл електростатичного поля силового одножилкового кабелю за нормального режиму роботи та в умовах підвищення напруги на 20 %

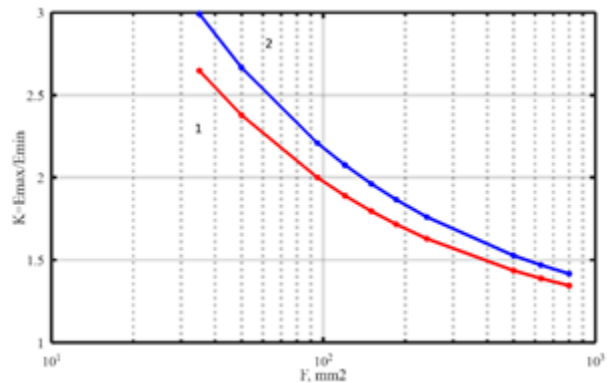


Рисунок 5 – Коефіцієнт нерівномірності розподілення напруженості електричного поля по товщині ізоляції силових кабелів напруги 20 кВ різного перерізу F

У разі струмопровідних жил меншого перерізу спостерігається більша нерівномірність розподілення електричного поля (рис.5): для жил перерізом 35 мм² – на 15 %, для жил перерізом 240 мм² – на 12,5 %, для жил перерізом 800 мм² – на 8,5 % при збільшенні товщини на 18 % з 5,5 мм (рис. 5, крива 1) до 6,5 мм (рис. 5, крива 2). При збільшеній товщині ізоляції за нормального режиму роботи та при $U_m = 1,2U_n$ середнє значення напруженості поля для кривих 4-3 та 4'-3' (рис. 5) не перевищує 2,1 кВ/мм. Це узгоджується з рекомендаціями міжнародних стандартів [34] та не призводить до виникнення часткових розрядів у повітряних порожнинах з діелектричною проникністю

$\varepsilon = 1,00256$ розміром менше 80 мкм (рис. 6, крива 3') в товщі зшитої поліетиленової ізоляції силових кабелів. Утворення об'ємних зарядів у суцільній зшитій поліетиленовій ізоляції відбувається за напруженості електричного поля 10–20 кВ/мм, у повітряних проміжках – за напруженості 2,1 кВ/мм [35, 36]. Це пробивна напруженість повітря у міліметровому діапазоні товщини [35].

Часткові розряди в твердій поліетиленовій ізоляції за умови однофазного замикання в мережі.

На рис. 6 показано результати розрахунку в залежності від товщини (x) повітряного включення його пробивної напруги U_{xbr} (крива 1) і розрахункових значень напруги на включенні в зшитій поліетиленовій ізоляції товщині 5,5 мм (криві 2 та 2') і 6,5 мм (криві 3 та 3') за нормального режиму роботи (криві 2 та 3) та за умови однофазного замикання $U_{\phi} = U_{л}$ в кабельній лінії (криві 2' та 3') напруги 20 кВ з перерізом струмопровідної жили 240 мм². Тиск повітря у включенні – 760 мм. рт. ст.

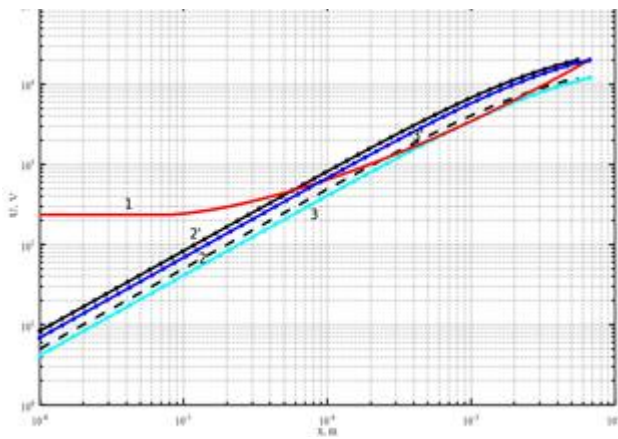


Рисунок 6 – Визначення діапазону активованих повітряних проміжків при варіюванні товщини зшитої поліетиленової ізоляції одножилного силового кабелю напруги 20 кВ за нормального режиму роботи та однофазного замикання на землю

При однофазному замиканні $U_{\phi} = U_{л}$ в зшитій поліетиленовій ізоляції товщині 5,5 мкм активізуються повітряні включення розміром від 50 мкм: перетин кривих 1 та 2' на рис. 6. Найбільш вірогідніше такі включення розташовані поблизу струмопровідної жили: напруженість електростатичного поля найбільша саме на поверхні струмопровідної жили (рис. 4 крива 1). Це призводить до інтенсифікації процесів старіння високоякісної полімерної ізоляції під дією часткових розрядів (ЧР).

Відповідно до рекомендацій [29] щодо вимог до однорідності ізоляції силових кабелів середньої напруги розмір неприпустимих домішок не повинен перевищувати 200 мкм. У кабелях високої напруги 110–220 кВ – 70–100 мкм [37]. На технологічній стадії виготовлення кабелів контролюється тільки амплітуда уявного заряду за одного значення підвищеної напруги частоти 50 Гц. Такий усталений підхід контролю виконує лише функції індикації наявності небезпечних повітряних включень та локалізації місця їх розташування за довжиною кабелю і не дозволяє

визначати розміри включень. У товщі твердої ізоляції повітряні включення є статичними дефектами [38]. При декількох значеннях випробувальної напруги [38, 39] включення повністю активізуються за площею, що пов'язано з фіксацією амплітуди уявного заряду, та за товщиною [38], що пов'язано з рівнем прикладеної напруги. Саме такий контроль дозволяє повністю оцінити небезпечні повітряні включення різного розміру. Виконання вимірювань ЧР за кількох значень випробувальної напруги з отриманою динамікою змінення частоти імпульсів часткових розрядів за відповідною методикою надає можливість отримати геометричні параметри включень з оцінкою їх небезпеки [38].

Аналіз отриманих результатів електричних характеристик ЧР в кабелях середньої напруги може використовувати алгоритми штучного інтелекту, у тому числі і машинного навчання [40]. Але існують певні вимоги та виклики до фундаментальних професійних знань з розумінням фізичних процесів та практичними навичками інтерпретації даних контролю.

Відносно значення електричної ємності як параметр ефективності силових кабелів. Системи електропередачі з відновлюваними джерелами генерації включають не тільки силові кабелі з полімерною ізоляцією, але й повітряні лінії, трансформатори та шунтуючі реактори [10]. Характеристики силових кабелів з полімерною, зокрема, зшитою поліетиленовою, ізоляцією відрізняються від характеристик звичайних повітряних ліній. Ємність кабелю має більші значення ємності еквівалентної повітряної лінії, що потенційно може призвести до появи резонансної частоти навіть у низькочастотному діапазоні при протяжності лінії до 10–20 км [19,23]. Резонансні процеси можуть бути викликані включенням трансформатора або шунтуючого реактора. Більше значення ємності кабелю (діелектрична проникність полімерної ізоляції принаймні в 2,3 рази більша, ніж у повітря) обумовлює протікання струму, навіть за умови розвантаження кабелю. Цей ємнісний зарядний струм і його значення в залежності від рівня напруги може бути у 50–60 разів вище, ніж у повітряної лінії.

Збільшення товщини ізоляції силових кабелів обумовлює зменшення електричної ємності (рис. 7), що сприятиме зменшенню ємнісного зарядного струму в кабельній лінії. Ефективна ємність кабелю $C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0}{\log\left(\frac{r_{i3}}{R_1}\right)}$ Ф/м з напівпровідними екранами визначається діелектричною проникністю $\varepsilon = 2,3$ зшитої поліетиленової ізоляції та її товщиною $\Delta = r_{i3} - R_1$, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична стала. Вплив напівпровідних екранів на електричну ємність несуттєво проявляється у високочастотному діапазоні [31].

На рис. 7 наведено порівняльний аналіз визначених значень електричної ємності в залежності від перерізу струмопровідних одножилних кабелів напруги 20 кВ. Крива 1 відповідає мінімальному значенню 5,5 мм товщини зшитої поліетиленової ізоляції, крива 2 – збільшеній на 18%. В табл. 2

представлено відношення електричної ємності кабелів зі зменшеною товщиною ізоляції до ємності кабелів зі збільшеною на 18 % товщиною для струмопровідних жил різного перерізу.

Відносне значення електричної ємності характеризує ефективність силових кабелів зі збільшеною товщиною ізоляції. Причому, збільшення товщини ізоляції найбільш ефективно для струмопровідних жил більшого перерізу.

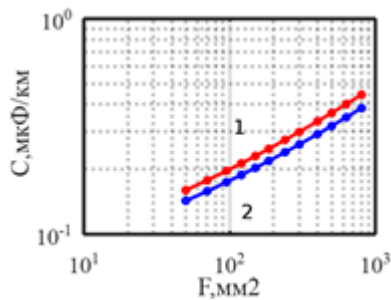


Рисунок 7 – Збільшення товщини ізоляції як ефективний фактор зменшення електричної ємності одножильних силових кабелів на напругу 20 кВ

Таблиця 2 – Вплив збільшення товщини ізоляції на відносне зменшення електричної ємності в залежності від перерізу струмопровідних жил силових кабелів напруги 20 кВ

Переріз F струмопровідної жили, мм ²									
50	95	120	150	185	240	400	500	630	800
Відносне значення електричної ємності ΔC , %									
11,9	12,8	13,1	13,4	13,7	14,1	14,7	14,9	15,2	15,5

При збільшенні перерізу у 2 рази зі 120 мм² до 240 мм² ефективність зростає на 7,6 %, при збільшенні перерізу у 3,3 рази зі 240 мм² до 800 мм² ,практично, на 10 %. Відповідно, струм зарядки $I_{charge} = U_{\phi} \cdot \omega \cdot C$ за нормальних умов експлуатації на змінній напрузі кругової частоти $\omega = 314$ 1/рад (промислової частоти 50 Гц) зменшується пропорційно відповідно до значень електричної ємності. Так, для кабелів з перерізом струмопровідних жил 50 мм², 240 мм² та 800 мм² струм зарядки становить: за мінімальної товщини зшитої поліетиленової ізоляції 5,5 мм – 0,602 А/км; 1,032 А/км та 1,66 А/км; за збільшеної товщини ізоляції 6,5 мм – 0,54 А/км; 0,90 А/км та 1,43 А/км відповідно.

Висновки.

1. Показано, що інтеграція розподіленої генерації трансформує електричні мережі середньої напруги з пасивних радіальних систем в активні та призводить до прояву негативних фізичних процесів у мережі: зміни профілів напруги та однофазних замикань, які безпосередньо впливають на технічний стан силових кабельних ліній.

2. Проведено обчислювальні експерименти за двох сценаріїв варіювання товщини ізоляції з визначенням розподілу електростатичного поля у силових кабелях середньої напруги 20 кВ в залежності від перерізу струмопровідних жил. За мінімального значення товщини ізоляції 5,5 мкм напруженість електростатичного поля на поверхні струмопровідної жили перевищує напругу початку часткових розрядів

повітряних проміжках навіть за нормального режиму роботи. При однофазному замиканні в ізоляції такої товщини активізуються повітряні включення розміром від 50 мкм, що призводить до інтенсифікації процесів старіння високоякісної полімерної ізоляції під дією часткових розрядів.

3. Акцентовано на необхідності проведення вимірювань часткових розрядів на технологічній стадії виготовлення силових кабелів шляхом сканування за декількох значень випробувальної напруги для оцінки діапазону розмірів активованих повітряних включень в товщі зшитої поліетиленової ізоляції.

4. Встановлено, що найбільш ефективно збільшення на 18 % товщини ізоляції спостерігається у кабелях з більшим перерізом струмопровідних жил. Для таких силових кабелів у меншій мірі прослідковується нерівномірність розподілення електричного поля по товщині ізоляції та у більшій мірі зменшення електричної ємності, а значить і ємнісного струму зарядки. Ефективність зменшення струму зарядки кабелів зі збільшеною товщиною дорівнює 11 %, 15 % та 16 % для струмопровідних жил перерізом 50 мм², 240 мм² та 800 мм² відповідно.

5. Ефективність конструктивного рішення щодо збільшення товщини ізоляції в силових кабелях зі струмопровідними жилами більшого перерізу зростає в системах з релейним захистом та автоматикою, в яких замикання на землю та знеструмлення пошкодженої ділянки не усувається протягом 1 години.

6. Запропонований шлях підвищення функціональності силових кабелів дозволяє у цілому підвищити стійкість та надійність активних електричних мереж середньої напруги з розподіленою генерацією попри економічні чинники зростання вартості силового кабелю.

Список літератури

1. Intel Market Research. Medium voltage underground power cable market growth analysis, dynamics, key players and innovations, outlook and forecast 2026-2032. 2026. 126 p. URL: <https://www.intelmarketresearch.com/medium-voltage-underground-power-cable-market-22281>.
2. International Energy Agency. Renewables 2025. Analysis and forecasts to 2030. Paris, France : IEA, 2025. 238 p. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/76ad6eac-2aa6-4c55-9a55-b8dc0dba9f9e/Renewables2025.pdf>.
3. The role of renewable energy in the global energy transformation / D. Gielen et al. *Energy Strategy Reviews*. 2019. Vol. 24. P. 38–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>.
4. Public acceptance and preferences related to renewable energy and grid expansion policy: Empirical insights for Germany / V. Bertsch et al. *Energy*. 2016. Vol. 114. P. 465–477. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.022>.
5. Mueller C. E., Keil S. I., Bauer C. Underground cables vs. overhead lines: quasi-experimental evidence for the effects on public perceptions and opposition. 2018. 33 p. (Preprint. Institute for Regulatory Impact Assessment and Evaluation, German Research Institute for Public Administration). DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29785.21606>.
6. Yavor K. M., Bach V., Finkbeiner M. Resource assessment of renewable energy systems—a review. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, no. 11. 6107. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13116107>.
7. International Energy Agency. Electricity Grids and Secure Energy Transitions. Enhancing the foundations of resilient, sustainable and affordable power systems. Paris, France, 2023. 130 p. URL:

- <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ca2ff609-8180-4312-8de9-494bcf21696d/ElectricityGridsandSecureEnergyTransitions.pdf>.
8. Concepts for considering environmental needs and personal safety for substitution design and increasing the resilience of the grid / M. Stoessl et al. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*. 2023. Vol. 140, no. 1. P. 185–192. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00502-022-01096-z>.
 9. Зайцев Є. О., Кучанський В. В., Гунько І. О. Підвищення експлуатаційної надійності та ефективності роботи електричних мереж та електроустановок: монографія. Вінниця: ГО «Європейська наукова платформа», 2021. 156 с. DOI: <https://doi.org/10.36074/penereme-monograph.2021>.
 10. Лежнюк П. Д., Рубаненко О. Є., Гунько І. О. Оптимізація режимів електричних мереж з відновлюваними джерелами електроенергії: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2018. 174 с.
 11. Кирик В. В., Циганенко Б. В., Яндюльський О. С. Розподільні електричні мережі напругою 20 кВ та ефективність їх роботи: монографія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 226 с.
 12. Кирик В. В., Богомолова О. С. Ефективність електропостачання споживачів на рівні напруги 20 кВ. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2025. № 3. С. 46–52. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2025.339752>.
 13. Bezprozvannyh G. V., Zolotaryov V. M., Antonets Y. A. High voltage cable systems with integrated optical fiber for monitoring cable lines. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 5–10 October 2020. 2020. P. 407–410. DOI: <https://doi.org/10.1109/khpiweek51551.2020.9250174>.
 14. NKT. Annual report 2025. 2025. URL: <https://investors.nkt.com/files/Main/23044/4312549/nkt-annual-report-2025.pdf>.
 15. Meskin M., Domijan A., Grinberg I. Impact of distributed generation on the protection systems of distribution networks: analysis and remedies – review paper. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2020. Vol. 14, no. 24. P. 5944–5960. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1652>.
 16. Кабелі силові з XLPE ізоляцією 6-35 кВ. ПАТ «Одескабель». URL: <https://odeskabel.com/ua/products/kabeli-silovye/kabeli-silovye-s-xlpe-izolyatsiej-6-35-kv.html>.
 17. Кабелі силові з XLPE ізоляцією 6...35 кВ. Довідник продукції ПАТ «ЗАВОД ПВДЕНКАБЕЛЬ». URL: <https://www.yuzhcadle.info/cat/10>.
 18. Četković D., Žutolija J., Komen V. Voltage rise mitigation in medium-voltage networks with long underground cables and low power demand. *Energies*. 2024. Vol. 17, no. 13. 3174. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17133174>.
 19. Distributed generation and renewable energy integration into the grid: prerequisites, push factors, practical options, issues and merits / C. D. Iweh et al. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 17. 5375. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14175375>.
 20. Review of power system impacts at high PV penetration Part I: Factors limiting PV penetration / O. Gandhi et al. *Solar Energy*. 2020. Vol. 210. P. 181–201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.097>.
 21. Harmonic effects due to the high penetration of photovoltaic generation into a distribution system / J. L. M. Pereira et al. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 13. 4021. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14134021>.
 22. Bezprozvannyh G. V., Kostiuikov I. A. A calculation model for determination of impedance of power high voltage single-core cables with polymer insulation. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2021. No. 3. P. 47–51. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2021.3.08>.
 23. Bezprozvannyh G. V., Grynyshyna M. V. A generalized approach to deduce the wave parameters of high-voltage single-core power cables. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2–6 October 2023. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/khpiweek61412.2023.10312805>.
 24. Перенапруги під час дугових однофазних замикань на землю в електричних мережах 35 кВ / М. С. Сегеда та ін. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2021. № 60 (2021). С. 38–43. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.60.038>.
 25. Impact of heat pump and cogeneration integration on power distribution grids based on transition scenarios for heating in urban areas / M. Fesefeldt et al. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, no. 6. 4985. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15064985>.
 26. N2XS(FL)H 12/20 (24) kV Cable Technical Datasheet. *Eland Cables*. URL: <https://www.elandcables.com/media/1mxhkct5/n2xs-fl-h-12-20-24-kv-cable-datasheet.pdf>.
 27. ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT). Чинний від 2023-12-08. Вид. офіц. 2025. 42 с.
 28. Okoguard-Okoseal Type MV-105 15kV Shielded Power Cable. *The Okonite Company*. URL: <https://www.okonite.com/media/catalog/product/files/2-59.pdf?v=1743428498>.
 29. ДСТУ ІЕС 60502-2:2023. Кабелі силові з екструдованою ізоляцією й арматура до них на номінальну напругу від 1 кВ ($U_m = 1,2$ кВ) до 30 кВ ($U_m = 36$ кВ). Частина 2. Кабелі на номінальну напругу від 6 кВ ($U_m = 7,2$ кВ) до 30 кВ ($U_m = 36$ кВ) (ІЕС 60502-2:2014, IDT). На заміну ДСТУ ІЕС 60502-2:2009; чинний від 2024-06-01. Вид. офіц. 2023.
 30. Безпрозваних Г. В., Гринишина М. В. Електрофізичні процеси у композитних напівпровідних екранах та їхній вплив на діелектричні параметри силових високовольтних кабелів. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 2 (2024). С. 12–22. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.02.012>.
 31. Безпрозваних Г. В., Гринишина М. В. Ефективні параметри діелектричної абсорбції полімерної ізоляції з напівпровідними покриттями силових високовольтних кабелів. *Електротехніка і електромеханіка*. 2022. № 3. С. 39–45. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2022.3.06>.
 32. Hansen J. Z. Failure statistic for medium voltage cable systems in Denmark. *27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023)*, Rome, Italy, 12–15 June 2023. 2023. P. 2208–2212. DOI: <https://doi.org/10.1049/icp.2023.1207>.
 33. Harmonic problems in renewable and sustainable energy systems: a comprehensive review / H. Eroglu et al. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021. Vol. 48. 101566. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101566>.
 34. ІЕС 60270:2025. High-voltage test techniques – Charge-based measurement of partial discharges. Effective from 2025-06-05. Official edition. ІЕС, 2025. 147 p.
 35. Беспрозванных А. В. Сильное электрическое поле и частичные разряды в многожильных кабелях. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 1. С. 23–29.
 36. Безпрозваних Г. В., Гонтар Ю. Г., Пушкар І. А. Розподіл електростатичного поля в неекраниваних силових кабелях з різною конфігурацією струмопровідних провідників. *Технічна електродинаміка*. 2025. № 4 (2025). С. 29–41. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2025.04.029>.
 37. Беспрозванных А. В., Набока Б. Г., Москвитин Е. С. Обоснование электрофизических характеристик полупроводящих экранов силовых кабелей высокого напряжения со сшитой изоляцией. *Електротехніка і електромеханіка*. 2010. № 3. С. 44–47.
 38. Беспрозванных А. В. Способы представления дифференциальных амплитудных спектров импульсов частичных разрядов в твердой изоляции. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 4. С. 12–19.
 39. Diagnostics analysis of partial discharge events of the power cables at various voltage levels using ramping behavior analysis method / S. Mishra et al. *Electric Power Systems Research*. 2024. Vol. 227, B. 109988. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109988>.
 40. A review on the classification of partial discharges in medium-voltage cables: detection, feature extraction, artificial intelligence-based classification, and optimization techniques / H. Kumar et al. *Energies*. 2024. Vol. 17, no. 5. 1142. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17051142>.

References

1. Intel Market Research, “Medium voltage underground power cable market growth analysis, dynamics, key players and innovations, outlook and forecast 2026-2032,” 24WT-22281, Jan. 2026. [Online]. Available: <https://www.intelmarketresearch.com/medium-voltage-underground-power-cable-market-22281>
2. International Energy Agency, “Renewables 2025. Analysis and forecasts to 2030,” IEA, Paris, France, Oct. 2025. [Online]. Available: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/76ad6eac-2aa6-4c55-9a55-b8dc0dba9f9e/Renewables2025.pdf>

3. D. Gielen, F. Boshell, D. Saygin, M. D. Bazilian, N. Wagner, and R. Gorini, "The role of renewable energy in the global energy transformation," *Energy Strategy Reviews*, vol. 24, pp. 38–50, Apr. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>
4. V. Bertsch, M. Hall, C. Weinhardt, and W. Fichtner, "Public acceptance and preferences related to renewable energy and grid expansion policy: Empirical insights for Germany," *Energy*, vol. 114, pp. 465–477, Nov. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.022>
5. C. E. Mueller, S. I. Keil, and C. Bauer, *Underground Cables vs. Overhead Lines: Quasi-Experimental Evidence for the Effects on Public Perceptions and Opposition*. To be published, doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29785.21606>
6. K. M. Yavor, V. Bach, and M. Finkbeiner, "Resource assessment of renewable energy systems—a review," *Sustainability*, vol. 13, no. 11, May 2021, Art. no. 6107, doi: <https://doi.org/10.3390/su13116107>
7. International Energy Agency, "Electricity Grids and Secure Energy Transitions. Enhancing the foundations of resilient, sustainable and affordable power systems," Paris, France, Sep. 2023. [Online]. Available: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ea2ff609-8180-4312-8de9-494bcf21696d/ElectricityGridsandSecureEnergyTransitions.pdf>
8. M. Stoessl, E. Schweiger, D. Helbig, and O. Dohnke, "Concepts for considering environmental needs and personal safety for substation design and increasing the resilience of the grid," *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 140, no. 1, pp. 185–192, Feb. 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s00502-022-01096-z>
9. Ye. O. Zaitsev, V. V. Kuchanskiy, and I. O. Hunko, *Pidvyshchennia ekspluatatsiinoi nadinosti ta efektyvnosti roboty elektrychnykh merezh ta elektrostakovannia [Increasing the operational reliability and efficiency of electrical networks and electrical equipment]*. Vinnytsia: NGO Eur. Scientific Platform, 2021, doi: <https://doi.org/10.36074/penereme-monograph.2021> (in Ukrainian)
10. P. D. Lezhniuk, O. Ye. Rubanenko, and I. O. Hunko, *Optymizatsiia rezhymiv elektrychnykh merezh z vidnovliuvanymy dzherelamy elektroenerhii [Optimization of electrical network modes with renewable sources of electricity]*. Vinnytsia: VNTU, 2018. (in Ukrainian)
11. V. V. Kyryk, B. V. Tsyhanenko, and O. S. Yandulskyi, *Rozpodilni elektrychni merezhi napruhoiu 20 kV ta efektyvnist yikh roboty [Distribution electric networks with a voltage of 20 kV and their efficiency]*. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2018. (in Ukrainian)
12. V. Kyryk and O. Bohomolova, "Efficiency of power supply to consumers at the 20 kV voltage level," *POWER ENGINEERING: Economics, Technique, Ecology*, no. 3, pp. 11–17, Oct. 2025, doi: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2025.339752> (in Ukrainian)
13. G. V. Bezprozvannykh, V. M. Zolotaryov, and Y. A. Antonets, "High voltage cable systems with integrated optical fiber for monitoring cable lines," in *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, Oct. 5–10, 2020. IEEE, 2020, pp. 407–410, doi: <https://doi.org/10.1109/khpiweek51551.2020.9250174>
14. NKT, "Annual report 2025," Feb. 2025. [Online]. Available: <https://investors.nkt.com/files/Main/23044/4312549/nkt-annual-report-2025.pdf>
15. M. Meskin, A. Domijan, and I. Grinberg, "Impact of distributed generation on the protection systems of distribution networks: Analysis and remedies – review paper," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, no. 24, pp. 5944–5960, Dec. 2020, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1652>
16. "Power cables with XLPE insulation 6-35 kV." PJSC "Odeskabel" [Online]. Available: <https://odeskabel.com/en/products/kabeli-silovye/kabeli-silovye-s-xlpe-izolyatsiej-6-35-kv.html>
17. "XLPE-insulated power cables for voltage from 6 to 35 kV." PJSC "Yuzhcable Works" Production Guide. [Online]. Available: <https://www.yuzhcable.info/cat/10lang/en>
18. D. Četković, J. Žutolija, and V. Komen, "Voltage rise mitigation in medium-voltage networks with long underground cables and low power demand," *Energies*, vol. 17, no. 13, Jun. 2024, Art. no. 3174, doi: <https://doi.org/10.3390/en17133174>
19. C. D. Iweh, S. Gyamfi, E. Tanyi, and E. Effah-Donyina, "Distributed generation and renewable energy integration into the grid: Prerequisites, push factors, practical options, issues and merits," *Energies*, vol. 14, no. 17, Aug. 2021, Art. no. 5375, doi: <https://doi.org/10.3390/en14175375>
20. O. Gandhi, D. S. Kumar, C. D. Rodríguez-Gallegos, and D. Srinivasan, "Review of power system impacts at high PV penetration Part I: Factors limiting PV penetration," *Solar Energy*, vol. 210, pp. 181–201, Nov. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.097>
21. J. L. M. Pereira, A. F. R. Leal, G. O. d. Almeida, and M. E. d. L. Tostes, "Harmonic effects due to the high penetration of photovoltaic generation into a distribution system," *Energies*, vol. 14, no. 13, Jul. 2021, Art. no. 4021, doi: <https://doi.org/10.3390/en14134021>
22. G. V. Bezprozvannykh and I. A. Kostiukov, "A calculation model for determination of impedance of power high voltage single-core cables with polymer insulation," *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 3, pp. 47–51, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2021.3.08>
23. G. V. Bezprozvannykh and M. V. Grynshyyna, "A generalized approach to deduce the wave parameters of high-voltage single-core power cables," in *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, Oct. 2–6, 2023. IEEE, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/khpiweek61412.2023.10312805>
24. M. S. Sehedá, O. M. Ravlyk, Z. M. Bakhor, and A. Y. Yatseyko, "Overtoltage during arc single-phase earth failures in 35 kV electrical networks," *Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, vol. 2021, no. 60, pp. 38–43, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.60.038> (in Ukrainian)
25. M. Fesefeldt, M. Capezzali, M. Bozorg, and R. Karjalainen, "Impact of heat pump and cogeneration integration on power distribution grids based on transition scenarios for heating in urban areas," *Sustainability*, vol. 15, no. 6, Mar. 2023, Art. no. 4985, doi: <https://doi.org/10.3390/su15064985>
26. "N2XS(FL)H 12/20 (24)kV Cable Technical Datasheet." Eland Cables. [Online]. Available: <https://www.elandcables.com/media/1mxhkcst/n2xs-fl-h-12-20-24-kv-cable-datasheet.pdf>
27. *Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks*, EN 50160:2022CEN/CENELEC.
28. "Okoguard-Okoseal Type MV-105 15kV Shielded Power Cable." The Okonite Company. [Online]. Available: <https://www.okonite.com/media/catalog/product/files/2-59.pdf?v=1743428498>
29. *Power Cables With Extruded Insulation and Their Accessories for Rated Voltages From 1 kV (Um = 1,2 kV) Up to 30 kV (Um = 36 kV) - Part 2: Cables for Rated Voltages From 6 kV (Um = 7,2 kV) Up to 30 kV (Um = 36 kV)*, IEC 60502-2:2014, TC 20 Electric cables, 2014.
30. G. V. Bezprozvannykh and M. V. Grynshyyna, "Electrophysical processes in composite semiconductor screens and their influence on the dielectric parameters of high voltage power cables," *Tekhnichna Elektrodynamika*, no. 2 (2024), pp. 12–22, Apr. 2024, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2024.02.012> (in Ukrainian)
31. G. V. Bezprozvannykh and M. V. Grynshyyna, "Effective parameters of dielectric absorption of polymeric insulation with semiconductor coatings of power high voltage cables," *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 3, pp. 39–45, May 2022, doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2022.3.06>
32. J. Z. Hansen, "Failure statistic for medium voltage cable systems in Denmark," in *27th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2023)*, Rome, Italy, Jun. 12–15, 2023. Institution Eng. Technol., 2023, pp. 2208–2212, doi: <https://doi.org/10.1049/icp.2023.1207>
33. H. Eroğlu, E. Cuce, P. Mert Cuce, F. Gul, and A. Iskenderoğlu, "Harmonic problems in renewable and sustainable energy systems: A comprehensive review," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 48, Dec. 2021, Art. no. 101566, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101566>
34. *High-Voltage Test Techniques – Charge-Based Measurement of Partial Discharges*, IEC 60270:2025, TC 42 High-voltage and high-current test techniques, 2025.
35. G. V. Bezprozvannykh, "Silnoe elektricheskoe pole i chastichnye razriady v mnogozhilnykh kabeliakh [Strong electric fields and partial discharges in multi-core cables]," *Tekhnichna Elektrodynamika*, no. 1, pp. 23–29, 2010. (in Russian)
36. G. V. Bezprozvannykh, Y. G. Gontar, and I. A. Pushkar, "Electrostatic field in unshielded power cables with different configurations of core," *Tekhnichna Elektrodynamika*, no. 4 (2025),

- pp. 29–41, Jun. 2025, doi: <https://doi.org/10.15407/techned2025.04.029> (in Ukrainian)
37. G. V. Bezprozvamykh, B. G. Naboka, and E. S. Moscvitin, "Substantiation of electrophysical characteristics of high-voltage power cable semiconducting screens with stitched insulation," *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 3, pp. 44–47, 2010. (in Russian)
38. G. V. Bezprozvamykh, "Ways of representation of differential peak spectra of pulses of partial discharges in solid insulation," *Tekhnichna Elektrodynamika*, no. 4, pp. 12–19, 2011. (in Russian)
39. S. Mishra, P. P. Singh, I. Kiitam, M. Shafiq, I. Palu, and C. Bordin, "Diagnostics analysis of partial discharge events of the power cables at various voltage levels using ramping behavior analysis method," *Electric Power Systems Research*, vol. 227, B, Feb. 2024, Art. no. 109988, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109988>
40. H. Kumar, M. Shafiq, K. Kauhaniemi, and M. Elmusrati, "A review on the classification of partial discharges in medium-voltage cables: Detection, feature extraction, artificial intelligence-based classification, and optimization techniques," *Energies*, vol. 17, no. 5, Feb. 2024, Art. no. 1142, doi: <https://doi.org/10.3390/en17051142>

Надійшла (Received) 16.03.2026

Прийнята (Accepted) 31.03.2026

Опублікована (Published) 29.05.2026

UDC 621.319

BEZPROZVANNYCH HANNA ✉ – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Electrical Insulation and Cable Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9584-3611>; e-mail: Hanna.Bezprozvannukh@kphi.edu.ua.

SHIATOVSLYI DENYS – Student of the Department of Electrical Insulation and Cable Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; e-mail: Denys.Siiatovskiy@ieec.kphi.edu.ua.

ENSURING THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF MEDIUM VOLTAGE POWER CABLES FOR ACTIVE NETWORKS WITH DISTRIBUTED GENERATION SOURCES

The article considers the strategic direction of development of the electric power industry of Ukraine, related to the renovation and modernization of medium voltage electric networks by transforming them from voltage levels of 6/10 kV to voltage of 20 kV with simultaneous integration with local sources of distributed generation. The resistance to potential threats of underground medium voltage cables with effective integration into modern architectures of ring and loop distribution networks is argued. The consequences of integration with the transformation of passive networks into active ones with processes of two-way exchange of electric energy are emphasized. The occurrence of increased voltage levels and dangerous single-phase short circuits, which directly affect the operational characteristics and technical condition of underground power cables, has been analyzed. Design directions have been identified to mitigate the impact of distributed generation on medium-voltage power cables with reduced risk levels in the network. It has been proven that a systematic increase in operating voltage by 20 % due to uncontrolled generation during hours of minimum load increases the electric field strength in homogeneous cable insulation. The effectiveness of a larger thickness of cross-linked polyethylene insulation in cables with a larger cross-section of conductive cores has been emphasized. It has been shown that under conditions of single-phase short circuits, increased voltage can become a catalyst for the development of partial discharges in smaller microcavities in cross-linked polyethylene insulation of 20 kV power cables. The need for partial discharge measurements at several test voltage values is emphasized to assess the size range of activated air inclusions in the thickness of cross-linked polyethylene insulation. The effectiveness of increasing the thickness of cross-linked polyethylene insulation in reducing the electrical capacitance and capacitive charging current of power cables of larger cross-section is substantiated.

Keywords: active distribution networks; medium voltage power cables; cable performance characteristics; insulation thickness; electrostatic field non-uniformity coefficient; single-phase short circuit; partial discharges in insulation; electrical capacitance and charging current of the cable.